

УДК 537.622.4

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ ($\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$) $_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ ВБЛИЗИ ПОРОГА ПЕРКОЛЯЦИИ

© 2019 г. Е. А. Фадеев¹, М. И. Блинов^{2, *}, В. В. Гаршин², О. С. Тарасова³, Е. А. Ганьшина²,
М. В. Прудникова², В. Н. Прудников², Э. Ляхдеранта¹, В. В. Рыльков⁴, А. Б. Грановский²

¹Технологический университет Лаппеэнранта, Лаппеэнранта, Финляндия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Воронежский государственный технический университет”, Воронеж, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение
“Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: mi.blinov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

В работе представлены результаты исследования магнитных и магнитооптических свойств нанокomпозитов состава $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $x = 30-72$ ат. %. Полученные данные указывают на то, что нанокomпозиты структурно неоднородны: имеются как крупные гранулы, так и мелкие частицы, независимо вносящие вклады разного характера в магнитные свойства материала. Для составов вблизи порога перколяции особенности поведения коэрцитивной силы указывают на суперферромагнитное упорядочение при низких температурах.

DOI: 10.1134/S0367676519070159

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные нанокomпозиты ферромагнитный металл–диэлектрик обладают комплексом разнообразных магнитных, магнитотранспортных, магнитооптических, высокочастотных свойств, перспективных для практического применения. С другой стороны, эти наногранулированные системы являются удобными объектами для изучения магнитных статических и динамических свойств ансамбля взаимодействующих магнитных частиц, так как при вариации концентрации и типа магнитной и диэлектрической компонент, размеров и форм гранул эти системы могут находиться в разных магнитных состояниях – от парамагнитного, спин-стекольного или суперпарамагнитного до суперферромагнитного и ферромагнитного [1]. Недавние детальные структурные исследования ряда нанокomпозитов (см., например, [2–4]) выявили, что наряду с гранулами сферической или вытянутой формы нанокomпозиты содержат и большое количество одиночных или ультрамалых кластеров магнитных ионов, которые могут сильно влиять на магнитные свойства. В частности, по-видимому, обмен ферромагнитного типа между гранулами возникает за счет

именно этих ионов в межгранульных промежутках, что позволяет объяснить возникновение суперферромагнетизма при концентрации гранул заведомо меньших порога перколяции [2–5].

В данной работе приводятся результаты исследования магнитных и магнитооптических свойств нанокomпозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ при содержании ферромагнитной компоненты $x = 30-72$ ат. %.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки толщиной примерно 1 мкм были получены методом ионно-лучевого распыления. Квазистатические магнитные свойства измерялись с помощью вибрационного магнитометра (LakeShore), СКВИД магнитометра (Стугеніс S700X) при 4.2–300 К в полях до 60 кЭ. Магнитооптические спектры изучались в геометрии экваториального эффекта Керра в спектральном диапазоне 0.5–4.0 эВ, в полях до 3 кЭ. при комнатной температуре. Действительная и мнимая части магнитной проницаемости определяли резонансным методом на частоте 50 МГц.

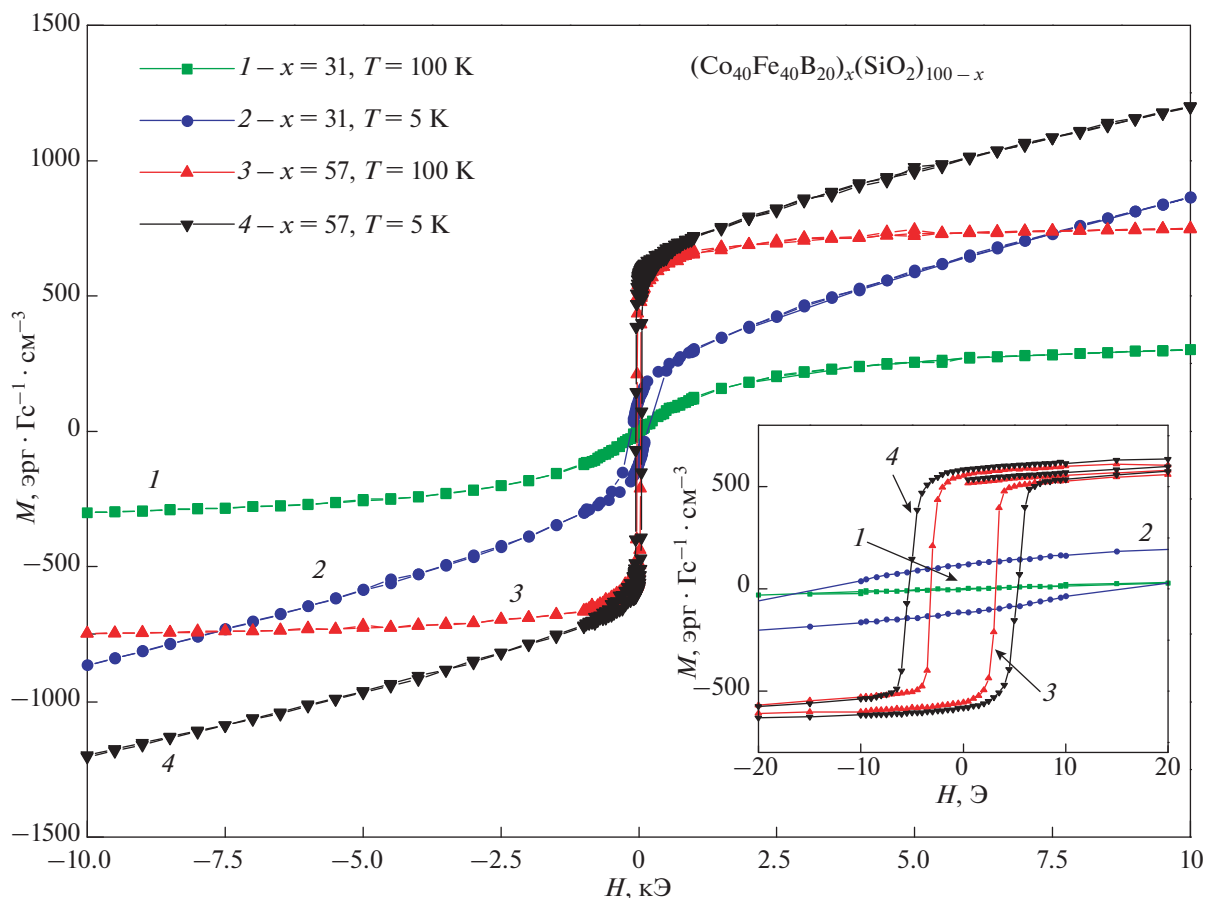


Рис. 1 Зависимость намагниченности от магнитного поля для образцов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{31}(\text{SiO}_2)_{69}$ и $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{57}(\text{SiO}_2)_{43}$ при температурах $T = 5$ и $T = 100$ К. На вставке отображены те же зависимости в крупном масштабе в слабых полях.

Структурные исследования, проведенные методами рентгеновской спектроскопии и электронной микроскопии (детали методик описаны в [2], указывают на то, что полученные образцы нестехиометрические по кислороду, и часть металлических компонентов присутствует не только в виде гранул, но и диспергированы в матрице в качестве более мелких частиц или изолированных ионов. Гранулы $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ обладают размером 2–4 нм [2–4].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Магнитные свойства

В работе исследовались полевые и температурные зависимости намагниченности. На рис. 1 в качестве типичных зависимостей намагниченности от магнитного поля для исследованной серии образцов приведены результаты для образцов с содержанием металла 31 и 57 ат. % при температурах 5 и 100 К. Рост намагниченности при малых температурах в сильных (2–10 кЭ) магнитных по-

лях, отсутствующий в слабых (~ 50 Э) полях, указывает на наличие парамагнитных центров, вклад в магнитный момент от которых проявляется более явно при низких температурах.

Для составов вблизи порога перколяции, составляющего согласно транспортным измерениям ~ 53 ат. %, зависимость коэрцитивной силы от температуры близка к корневой, что согласуется с теорией суперферромагнетизма [1, 5], а по мере отдаления от порога перколяции в область диэлектрика (< 31 ат. %) при повышении температуры ($T > 20$ К) коэрцитивная сила становится неразличима и намагничивание начинает происходить практически без гистерезиса. Однако наличие гистерезиса при низких температурах и корневая температурная зависимость коэрцитивной силы образцов ниже порога перколяции (см. вставку на рис. 1) указывает на наличие суперферромагнетизма: парамагнитные ионы, диспергированные в матрице, позволяют осуществлять суперферромагнитный обмен между металлическими гранулами [3, 4], а при увеличении температуры даль-

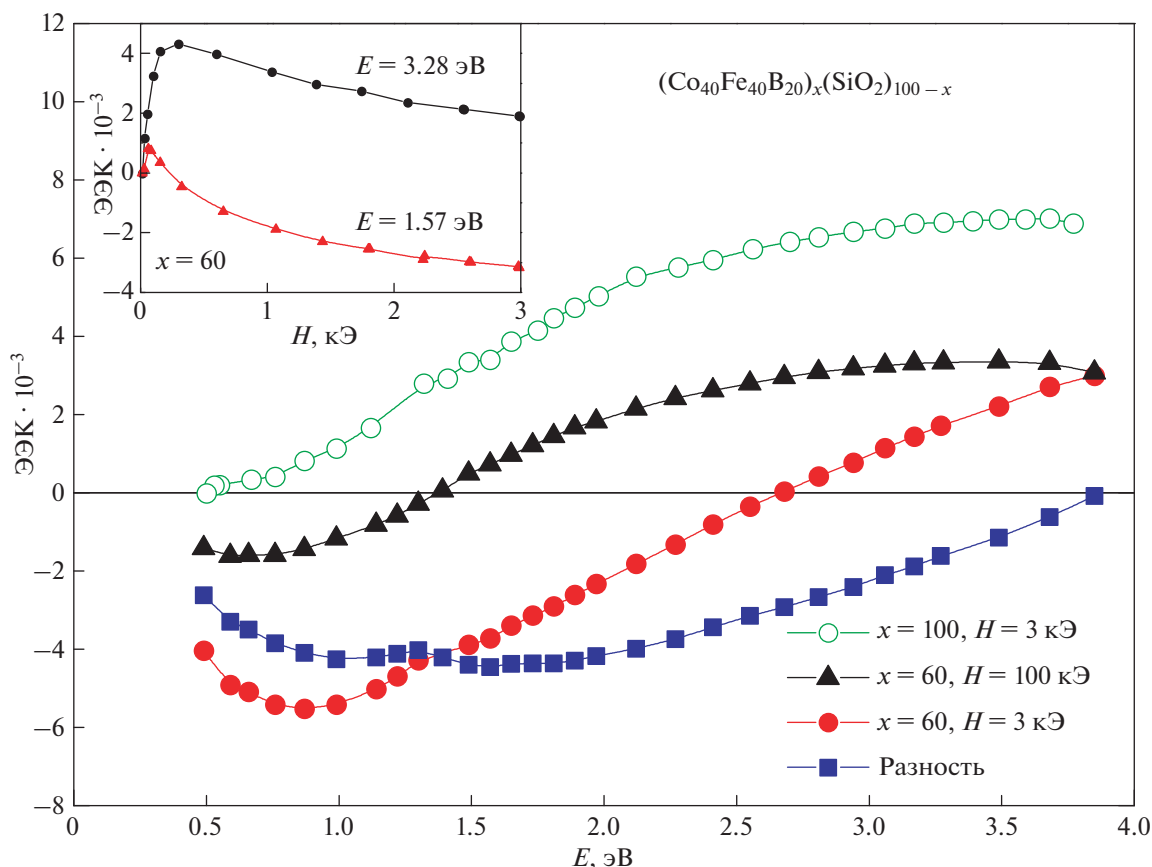


Рис. 2. Спектральные зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК) для образца $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$ при двух значениях магнитного поля 3 кЭ и 100 Э. На графике также приведен спектр для разности ЭЭК, полученного в сильном и слабом магнитных полях, и спектральная зависимость для чистого $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$. На вставке представлены полевые зависимости ЭЭК для двух энергий падающего света (1.57 и 3.28 эВ) для образца $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$.

ний суперферромагнитный порядок пропадает. Проведенные резонансным методом исследования магнитной проницаемости в зависимости от концентрации металла показывают, что при комнатной температуре суперферромагнитный порядок пропадает при концентрациях уже ниже порога перколяции.

Магнитооптические свойства

На рис. 2 представлены спектральные зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК) для одного из исследованных образцов – $(\text{CoFeB})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$ – для двух величин магнитного поля (100 Э и 3 кЭ). На рисунке также для удобства сравнения отображена разность эффектов при двух значениях магнитного поля и зависимость ЭЭК для образца со 100% содержанием металла. Характер зависимостей сильно изменяется при увеличении магнитного поля. При намагничивании в слабом поле основной вклад в эффект формируется за счет легко намагничивающихся

крупных ферромагнитных гранул – зависимость качественно близка к наблюдаемой для сплава CoFeB . При увеличении магнитного поля вклад от малых гранул, проявляющих в силу размерного эффекта отличные от вклада крупных гранул, магнитные, оптические и магнитооптические свойства, становится больше, что приводит к трансформации формы спектра и даже к другому знаку ЭЭК в некоторой области спектра (см. вставку на рис. 2). Вклад от малых гранул определен как разность спектров ЭЭК при двух значениях магнитных полей. Характер этого спектра подобен спектру для нанокомпозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ с малой концентрацией x [6].

Таким образом, исследование магнитооптических свойств указывает на наличие неоднородностей в размере и распределении ферромагнитных включений. Результаты исследования магнитных свойств нанокомпозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ при $x = 30-72$ ат. % показали наличие парамагнитных центров в межгранульных промежутках, которые вносят существенный вклад в магнитные

свойства материала в сильных магнитных полях, и наличие суперферромагнитного упорядочения при низких температурах для составов вблизи порога перколяции. Магнитооптические измерения подтвердили наличие структурной неоднородности в распределении и размере ферромагнитных гранул.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bedanta S., Kleemann W.* // J. Phys. D. 2009. V. 42. Art. № 013001.
2. *Rylkov V.V., Nikolaev S.N., Chernoglazov K.Yu. et al.* // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. Art. № 144202.
3. *Рыльков В.В., Николаев С.Н., Демин В.А. и др.* // ЖЭТФ. 2018. Т. 153. № 3. С. 424; *Rylkov V.V., Nikolaev S.N., Demin V.A. et al.* // JETP. 2018. V. 126. № 3. P. 353.
4. *Rylkov V.V., Sitnikov A.V., Nikolaev S.N. et al.* // J. Magn. Magn. Mat. 2018. V. 459. P. 197.
5. *Timofeev A.A., Bdikin I., Lozenko A.F. et al.* // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. Art. № 123915.
6. *Ганьшина Е.А., Вашук М.В., Виноградов А.Н. и др.* // ЖЭТФ. 2004. Т. 125. № 5. С. 1172; *Gan'shina E.A., Vashuk M.V., Vinogradov A.N. et al.* // JETP. 2004. V. 98. № 5. P. 1027.